准确理解电磁波传播速度的物理图像

汤克云

中国科学院地质与地球物理研究所

kytang@mail.igcas.ac.cn

摘 要

本文回顾了推导达朗贝尔波动方程的全过程，其中最重要的一步是用高斯定律和安培定律，分别导出了标势和矢势的达朗贝尔波动方程。本文强调：高斯定律是库伦定律的微分形式，其中的源电荷与观测者即场点是相对静止的；在安培定律中，源电流载体与观测者即场点也是相对静止的。本文的结论是：麦克斯韦方程组和达朗贝尔波动方程都是在源-观相对静止条件下的方程，达朗贝尔波动方程中的常数‘C’是在真空环境中，源-观相对静止条件下的传播速度。 在这样的特殊条件下，电磁波的传播空间是均匀和各向同性的，因此，无论传播的距离和方位几何，无论源-观所在的实验室位于哪个星球上，绝对运动如何，电磁波传播速度都相同，这是合乎逻辑的。 真空中的电磁波从源电荷、源电流发出，向各处的观测者传播，源-观相对静止，传播空间均匀而各向同性的，这是一个准确的物理图像，是准确理解光速不变原理的物理基础。

关键词：场源，观测者，源-观相对性，电磁场，电磁波，光速不变原理

The physical picture to understand the propagation of electromagnetic waves accurately

Keyun Tang

Institute of geology and geophysics, Chinese academy of sciences

kytang@mail.igcas.ac.cn

Abstract

In this paper, the whole process of derivation of D 'Alembert wave equation is reviewed. The most important step is to derive D 'Alembert wave equations of scalar potential and vector potential by using Gauss's law and Ampere's law. This paper emphasizes that Gauss's law is the differential form of Coulomb's law, where the charge source and the observer are relatively static; In Ampere's law, the carrier of current source and the observer are also relatively static. The conclusion of this paper is that both Maxwell's equations and D 'Alembert's wave equation are equations under the condition of source-observer relative resting, and the constant 'C' in D 'Alembert's wave equation is the propagation speed under the condition of source-observer relative resting in vacuum environment. Under such special conditions, the propagation space of electromagnetic wave is uniform and isotropic, so it is logical that the electromagnetic wave propagates at the same speed regardless of the distance and azimuth between source and observer, and regardless of the

absolute motion of the laboratory on which planet the source and observer are located. The electromagnetic wave in vacuum is emitted from the charge source and the current source, and propagates to observers everywhere. The source-observer is relatively static，the propagation space of electromagnetic wave is uniform and isotropic, this is an accurate physical image, which is the physical basis for accurately understanding the principle of the constant speed of light.

Keywords: field source, observer, source-to-observer relativity, electromagnetic field, electromagnetic wave, the principle of invariance of the light speed

一、 麦克斯韦方程组中的有源方程

在真空麦克斯韦方程组共有 4 个方程

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \tag{1.1}$$

$$\nabla \times \vec{B} - \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \mu_0 \vec{j} \tag{1.2}$$

$$\nabla \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \tag{1.3}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \tag{1.4}$$

其中，ε_0是真空中的介电常数，μ_0是真空中的导磁率。

前两个方程是有源方程。第一个方程（1.1）是高斯定律，包含源电荷，阐述了源电荷周围电场的分布情况。我们强调：源电荷与观

测者都静止于同一个实验室，源-观之间相对静止。

第二个方程（1.2）是安培定律，包含源电流，阐述了源电流周围的磁场分布情况，这里，考虑了位移电流对磁场的贡献。我们强调：源电流的载体（如导线）与观测者都静止于同一个实验室，源-观之间相对静止。

第三个方程是法拉第感应定律，第四个方程是说明不存在磁单极子，它们都不涉及源电荷与源电流。

总之，麦克斯韦方程组描述的是在源-观相对静止条件下的电磁规律。

二、重新推导达朗贝尔波动方程

物理大师们逐渐认识到：电场和磁场是一对相互联系并有某种对称性的物理概念；为了完整和对称地描述电磁场，大师们引进了标势 φ 和矢势 $\vec{A}$ 的概念。根据无源方程（1.4），可以引进矢势 $\vec{A}$，它与磁场 $\vec{B}$ 的关系是：

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \tag{2.1}$$

将（2.1）代入无源方程（1.3），知

$$\begin{aligned} &\nabla \times \vec{E} + \frac{\partial \nabla \times \vec{A}}{\partial t} = 0, \\ &\text{i.e.} \\ &\nabla \times (\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}) = 0 \end{aligned} \tag{2.2}$$

所以，$(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t})$ 应该是一个无旋场；我们知道，任意一个标量场 φ 的梯度就是一个无旋场，所以，可记为

$$\vec{E}+\frac{\partial\vec{A}}{\partial t}=-\nabla\varphi \tag{2.3}$$

即

$$\vec{E}=-\nabla\varphi-\frac{\partial\vec{A}}{\partial t} \tag{2.4}$$

梯度前取负号是因为电势的梯度方向与电场方向相反,这里，我们用标势和矢势共同描述电场。

现在，将（2.4）代入包含源电荷的高斯定律（1.1），得

$$\nabla\cdot(-\nabla\varphi-\frac{\partial\vec{A}}{\partial t})=\frac{\rho}{\varepsilon_0},$$

i.e. (2.5)

$$\nabla^2\varphi+\frac{\partial(\nabla\cdot\vec{A})}{\partial t}=-\frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

将（2.1）和（2.4）代入安培定律（1.2），得

$$\nabla\times\vec{B}-\varepsilon_0\mu_0\frac{\partial\vec{E}}{\partial t}=\mu_0\vec{j},$$

$$\nabla\times(\nabla\times\vec{A})-\varepsilon_0\mu_0\frac{\partial(-\nabla\varphi-\frac{\partial\vec{A}}{\partial t})}{\partial t}=\mu_0\vec{j}, \tag{2.6}$$

$$-\nabla^2\vec{A}+\nabla(\nabla\cdot\vec{A})+\varepsilon_0\mu_0(\nabla\frac{\partial\varphi}{\partial t}+\frac{\partial^2\vec{A}}{\partial t^2})=\mu_0\vec{j},$$

$$\nabla^2\vec{A}-\nabla(\nabla\cdot\vec{A}+\varepsilon_0\mu_0\frac{\partial\varphi}{\partial t})-\varepsilon_0\mu_0\frac{\partial^2\vec{A}}{\partial t^2}=-\mu_0\vec{j}$$

为简化方程，我们选择洛伦茨规范，即

$$\nabla\cdot\vec{A}+\varepsilon_0\mu_0\frac{\partial\varphi}{\partial t}=0 \tag{2.7}$$

方程（2.6）可简化为

$$\nabla^2\vec{A}-\varepsilon_0\mu_0\frac{\partial^2\vec{A}}{\partial t^2}=-\mu_0\vec{j} \tag{2.8}$$

再将洛伦茨规范（2.7）代入关于标势的波动方程（2.5），方程（2.5）可简化为

$$\nabla^2\varphi-\varepsilon_0\mu_0\frac{\partial^2\varphi}{\partial t^2}=-\frac{\rho}{\varepsilon_0} \tag{2.9}$$

至此，关于标势和矢势的波动方程简化为两个形式相同的达朗贝尔波动方程

$$\begin{aligned}&\nabla^2\varphi-\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2\varphi}{\partial t^2}=-\frac{\rho}{\varepsilon_0},\\&\nabla^2\vec{A}-\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2\vec{A}}{\partial t^2}=-\mu_0\vec{j}\end{aligned} \tag{2.10}$$

其中的常数 C 就是电磁波的传播速度

$$C\equiv\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} \tag{2.11}$$

完全取决于传播环境中的介电常数ε_0和导磁率μ_0。这里的ε_0是源、观之间的真空的介电常数，μ_0是源、观之间的真空的导磁率。

我们强调：这是在真空中，在源-观相对静止的条件下的传播环境的介电常数ε_0和导磁率μ_0，这里的 C 就是在源-观相对静止的条件下电磁场或电磁波的传播速度。

在真空中，在源-观相对静止的条件下，电磁场或电磁波的传播环境是均匀、各向同性的，介电常数ε_0是和导磁率μ_0都是真正的不变常数，所以，无论观测者相对于源电荷、源电流的距离和方位几何，无论源电荷、源电流和观测者所在的实验室的绝对运动情况如何，无论实验室是否在地球上，传播速度都应是相同的。这是合理的推论，不存在任何令人困惑的逻辑困难。

三、 关于爱因斯坦科学法则

人类一直在不懈地探索自然界的科学规律。自近代科学诞生以来，始终有各种争论。实际上，科学实验和科学争论是推动科学发展是两大动力。

对于伽利略的相对性原理，对于牛顿的力学定律和引力定律，对于爱因斯坦的相对性理论，对于玻尔的量子理论，始终存在激烈的争论。这些争论，深刻地推动了力学、电磁学、引力物理，相对论和量子力学的发展。

爱因斯坦是深刻的思想家，伟大的科学家。本文认为，爱因斯坦最伟大的科学贡献，是提出了可以客观地判断科学理论的两条科学法则：第一，理论不应当同经验事实相矛盾；但是，这里要避免一种情况："人们常常，甚至总是可以用人为的补充假设来使理论同事实相适应，从而坚持一种普遍的理论基础"。 第二，一个命题如果是在某一逻辑体系里按照公认的逻辑规则推导出来的，它就是正确的。

本文关于麦克斯韦方程组的论述，关于标势和矢势的论述，关于达朗贝尔波动方程的推导，关于传播环境的介电常数和导磁率的论述，关于电磁场和电磁波的产生和传播的论述，都是自然而合理的，符合爱因斯坦的科学法则，应当是正确的理论。

参考文献

[1].爱因斯坦，狭义与广义相对论浅说，北京大学出版社，2006.1，北京.
[2].J. D. Jackson, Classical Electrodynamics, 2nd edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1975.
[3].胡友秋 程福臻 叶邦角 刘之景,电磁学与电动力学(上册),科学出版社，2014.6，第二版，北京.
[4].胡友秋 程福臻，电磁学与电动力学（下册），科学出版社，2014.6，第二版，北京.
[5].俞允强，电动力学简明教程，北京大学出版社，1999.7，北京.
[6].郭硕鸿，电动力学（第二版），高等教育出版社，1997.7，北京.
[7].刘辽，费保俊，张允中，狭义相对论，科学出版社，2008.7，北京.
[8].林璇英 张之翔编著，电动力学题解，科学出版社，2000，北京.
[9].汤克云，洛伦兹变换只是数学表象推迟作用才是物理本质（修改稿），国家科技图书文献中心预印本系统，2014.6.12.
[10].汤克云，比较洛伦兹变换和推迟电磁场的独立实验，中国科学院预印本系统，2016.06.16.
[11].汤克云，对光速不变原理的完整思辨（补充稿），国家科技图书文献中心预印本系统，2021.09.08.